

Diss. ETH No. 18716

Joint Iterative Channel and Data Estimation in High Mobility MIMO-OFDM Systems

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
STEPHAN SAND
Dipl.-Ing., Universität Ulm
born December 24, 1975
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. A. Wittneben, examiner
Prof. Dr. H. Bölcskei, co-examiner
Dr. S. Kaiser, co-examiner

2009

Abstract

In recent years, wireless mobile communication systems have experienced an unprecedented growth in voice and data services. Future communication systems try to satisfy the increasing demand for these services by guaranteeing throughput rates of more than 100 Mbps outdoors and 1 Gbps indoors. Due to the large expenses on licensed spectrum, future communication systems require high spectral efficiency for broadband transmission.

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) in combination with bit-interleaved coded modulation (BICM) has turned out to be a robust yet implementation efficient technique for reliable broadband communication over fading channels. To achieve high spectral efficiency, BICM-OFDM systems employ higher order bit to symbol mappings and multiple-input multiple-output (MIMO) techniques to transmit several bits per time and frequency bin.

In this thesis, joint iterative channel and data estimation schemes for high mobility MIMO OFDM systems are developed and analyzed. Besides OFDM, we particularly consider OFDM code division multiplexing and its multiple access variant multi-carrier code division multiple access. The convergence behavior of iterative receivers and the resulting system performance is analyzed with extrinsic information transfer (EXIT) charts and bit-error rate or frame-error rate curves. Furthermore, we have developed adaptive bit loading (ABL) schemes that exploit channel state information at the transmitter (CSIT) in combination with iterative receivers and algorithms to estimate CSIT not only for time division duplex but also for frequency division duplex systems.

In the first part, we research iterative receiver algorithms for OFDM and OFDM code division multiplexing with BICM and perfect channel state information. We explain why it is necessary to iterate extrinsic instead of a-posteriori information. Then, we present a novel, analytic derivation to compute EXIT charts efficiently. We compare the EXIT charts to bit-error rate transfer charts with the result that EXIT charts predict the performance of iterative receivers more accurately. Further, we show that EXIT charts can predict the performance of

MIMO systems and channels only accurately if the channels are weakly correlated and the MIMO algorithms directly influence the demapper.

In the second part, we study iterative receivers with different channel estimation algorithms. Both joint a-posteriori probability iterative channel estimation and demapping and the optimum linear minimum mean square error channel estimation have high computational complexity. Hence, we propose suboptimum iterative channel estimation (ICE) algorithms with less complexity. When data symbols that have small amplitude values are used in ICE, noise enhancement can degrade the channel estimation. To avoid noise enhancement, we propose the modified least-squares error method or the modified minimum mean square error methods. To extend the ICE algorithms to MIMO systems, we either compute for each transmit antenna an interference-reduced receive signal or we exploit the orthogonality of the space-time-frequency codes. For a realistic MIMO channel model, simulated throughput results demonstrate that iterative receivers with ICE can double the throughput at medium signal-to-noise ratios.

In the third part, we investigate ABL algorithms. The ABL approach differs from error rate optimizing ABL schemes in the literature as we directly aim at minimizing the overall bit-error probability at the decoder output under the assumption of perfect CSIT. First, we develop a simple ABL scheme, whose complexity to search for the optimum bit loading scales linearly with the number of data symbols. Second, we extend the algorithm to higher order alphabets and an arbitrary bit-rate constraint. We combine the ABL scheme with transmit diversity techniques and iterative receivers so that ABL can yield significant performance gains versus uniform bit loading. In addition to perfect CSIT, we also develop a simple scheme to estimate the CSIT based on received pilot symbols that also takes into account the transmit diversity techniques. Thus, we consider the major factors contributing to unreliable CSIT for ABL, which are channel estimation errors, limited capacity in the feedback, and feedback delays.

Kurzfassung

In den letzten Jahren, haben drahtlose, mobile Kommunikationssysteme ein beispielloses Wachstum in Sprach- und Datendiensten erlebt. Zukünftige Kommunikationssysteme versuchen die gestiegene Nachfrage nach diesen Diensten dadurch zu befriedigen, dass sie einen Datendurchsatz von mehr als 100 Mbit/s im Freien und 1 Gbit/s in Gebäuden garantieren. Aufgrund der großen Kosten für lizenzierte Frequenzbänder, benötigen zukünftige Kommunikationssysteme eine hohe Bandbreiteneffizienz für breitbandige Übertragungen.

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) in Kombination mit Bit-Interleaved Coded Modulation (BICM) hat sich als eine robuste und effiziente Technik für zuverlässige breitbandige Kommunikation über Schwund-Kanäle erwiesen. Um eine hohe Bandbreiteneffizienz zu erreichen, benutzen BICM-OFDM Systeme höherwertige Modulationsalphabete sowie mehrere Empfangsantennen und mehrere Sendeantennen (MIMO) Techniken um etliche Bits pro Zeit- und Frequenzeinheit zu übertragen.

In dieser Dissertation, werden gemeinsame iterative Kanal- und Datenschätzverfahren für hoch mobile MIMO-OFDM Systeme entwickelt und analysiert. Neben OFDM, untersuchen wir insbesondere OFDM Code Division Multiplexing und seine mehrfach Zugriffsvariante Multi-Carrier Code Division Multiple Access. Das Konvergenzverhalten von iterativen Empfängern und die resultierende Systemleistung werden mit extrinsischen Informationstransfer (EXIT) Diagrammen und Bitfehlerraten- oder Paketrahmenfehlerraten-Kurven analysiert. Darüber hinaus haben wir adaptive Bitzuordnungsverfahren (ABL) entwickelt, die die Kanalzustandsinformation am Sender (CSIT) nutzen. Diese ABL Verfahren haben wir mit iterativen Empfängeralgorithmien kombiniert und Schätzverfahren für CSIT sowohl für Time Division Duplex als auch für Frequency Division Duplex Systeme entwickelt.

Im ersten Teil erforschen wir iterativen Empfängeralgorithmien für OFDM und OFDM Code Division Multiplexing mit BICM und perfekter Kanalzustandsinformation. Wir erklären, warum es nötig ist, extrinsische statt a-posteriori Information zu iterieren. Dann stellen wir eine neuartige, analytische Herleitung zur effizienten Berechnung von

EXIT-Diagrammen vor. Wir vergleichen die EXIT-Diagramme mit Bitfehlerraten-transfer-Diagrammen mit dem Ergebnis, dass EXIT-Diagramme genauere Vorhersagen über die Leistung iterativer Empfänger liefern. Darüber hinaus zeigen wir, dass EXIT-Diagramme die Leistung von MIMO Systemen und Kanälen nur korrekt vorhersagen können, wenn die Kanäle schwach korreliert sind und die MIMO Algorithmen direkt den Demodulator beeinflussen.

Im zweiten Teil untersuchen wir iterative Empfänger mit verschiedenen Kanalschätzverfahren. Sowohl gemeinsame a-posteriori-wahrscheinlichkeits iterative Kanal- und Datenschätzung als auch die optimale lineare-minimale-mittlere-quadratische Fehler Kanalschätzung haben eine hohe Komplexität. Daher schlagen wir suboptimale iterative Kanalschätzalgorithmen (ICE) mit weniger Komplexität vor. Wenn Datensymbole, die kleine Amplitudenwerte haben, in ICE verwendet werden, kann die Rauschverstärkung die Kanalschätzung verschlechtern. Um Rauschverstärkung zu verhindern, schlagen wir die modifizierte Fehlerquadrate Methode oder die modifizierte minimale-mittlere-quadratische Fehler Methode vor. Um die ICE-Algorithmen auf MIMO Systeme zu erweitern, berechnen wir entweder für jede Sendeantenne ein interferenzreduziertes Empfangssignal oder wir nutzen die Orthogonalität von Raum-Zeit-Frequenz-Codes. Für ein realistisches MIMO Kanalmodell zeigen die Simulationsergebnisse für den Datendurchsatz, dass iterative Empfänger mit ICE den Datendurchsatz bei mittleren Signal-zu-Rausch Verhältnissen verdoppeln können.

Im dritten Teil untersuchen wir ABL Algorithmen. Unser ABL Ansatz unterscheidet sich von Fehlerraten-optimierenden ABL Systemen in der Literatur dadurch, dass wir direkt darauf abzielen, die gesamte Bitfehlerwahrscheinlichkeit am Dekodiererausgang unter der Annahme einer perfekten CSIT zu minimieren. Zunächst entwickeln wir ein einfaches ABL Verfahren, dessen Komplexität für die Suche nach der optimalen Bitzuordnung linear mit der Anzahl der Datensymbole skaliert. Danach erweitern wir den Algorithmus auf höherwertige Symbolalphabete und eine beliebige Bitratenrandbedingung. Wir kombinieren das ABL Verfahren mit Sendediversitätstechniken und iterativen Empfängern, so dass ABL eine erhebliche Leistungssteigerung im Vergleich zu einer gleichförmigen Bitzuordnung erzielen kann. Zusätzlich zu perfekter CSIT, entwickeln wir auch ein einfaches Verfahren um die CSIT zu schätzen. Dieses Schätzverfahren, das auch die Sendediversitätstechniken berücksichtigt, basiert auf empfangenen Pilotsymbolen. Daher berücksichtigen wir die wichtigsten Faktoren, die zu unzuverlässiger CSIT in ABL führen. Diese sind die Kanalschätzfehler, begrenzte Übertragungskapazitäten bei der Rückführung der Pilotsymbole und die Verzögerung durch die Rückführung der Pilotsymbole.